

Der intelligente Tragflügel

Multifunktionale Klappen an der A350 XWB
und der Weg zu zukünftigen Konzepten



Bei Start und Landung eines Flugzeugs fallen sie beim Blick aus dem Fenster direkt ins Auge: die weit ausgefahrenen Klappen des „Hochauftriebssystems“. Sitzt man dann auch noch in einem Airbus-Flugzeug, blickt man auf einen zentralen Beitrag der Forschungs- und Entwicklungsingenieure von Airbus in Bremen. Ohne diese „Wunderwerke“ könnte keines der großen Flugzeuge auf den gegebenen Start- und Landebahnen der Flughäfen voll beladen abheben, geschweige denn langsam genug fliegen, um sicher zu starten oder zu landen.

An dem Airbus A350 XWB sind diese Klappen erstmals integraler Bestandteil eines multifunktionalen Tragflügels geworden: Ein intelligenter Flügel, der sich in seiner Form den Flugbedingungen entlang seines gesamten Flugprofils anpassen kann und auf diese Weise Kraftstoffverbrauch und Emissionen signifikant senkt.

Die Evolution der klassischen Klappensysteme

Die Tragflügel der Airbus-Modelle bis zum Airbus A380 stellen eine Evolutionskette dar, die in allen Fällen eine klassische funktionale Trennung der Komponenten des Tragflügels vorsieht: Jede Klappe hat genau eine Funktion. Die **Vorflügel** und **Hinterkantenklappen** werden nur für Start und Landung (die sogenannte Hochauftriebskonfiguration) ausgefahren. **Spoiler** und **Querruder** hingegen sind für die Steuerung und Luftbremsfunktion wichtig. Im Reiseflug sind die Klappen eingefahren und der Flügel verändert sich nicht, mit Ausnahme von kurzen Steuerfunktionen. Das funktioniert stabil und ist effektiv. Aber es geht eben noch effektiver.

Fortschrittliche numerische 3D-Rechenverfahren und Tests in Windkanälen sind heutzutage Standard für den Tragflügelentwurf. Die Effizienz der Klappensysteme konnte auf diese Weise in den letzten Dekaden drastisch verbessert werden. Moderne Entwürfe, wie zum Beispiel am Airbus A380, können mit Einfachspalt-Klappen die geforderten Flugleistungen erreichen. Ältere Modelle, wie die A300, brauchen für die gleiche Aufgabe noch deutlich komplexere und schwerere Doppel- oder Dreifachspalt-Klappensysteme. Die Spaltklappen sind dazu da, einen Strömungsabriss zu verhindern, was für eine Verringerung des Auftriebs sorgen würde.

Neue Potenziale in der Flügelauslegung

Wo aber liegt hier noch weiteres Optimierungspotenzial? Neue Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten legen einen starken Fokus auf den Schritt in die **Multifunktionalität**. Dabei werden alle Klappensysteme am Tragflügel im Sinne eines „adaptiven Tragflügels“ genutzt. Dieser kann in allen Flugzuständen in seiner Form angepasst (variable Wölbung bzw. „variable camber“) und optimiert werden. Ein Beispiel: Anstatt die Steuerflächen nur für die Steuerung der Maschine zu nutzen, wurden sie so entwickelt, dass sie außerdem die Druckverteilung, die resultierenden Tragflügelasten und damit den Widerstand im Reiseflug kontrollieren können.

Die erste erfolgreiche Entwicklung eines solchen Systems konnte im EU-Forschungsprogramm **AWIATOR (Aircraft Wing with Advanced Technology Operation)** bis hin zur Demonstration in der

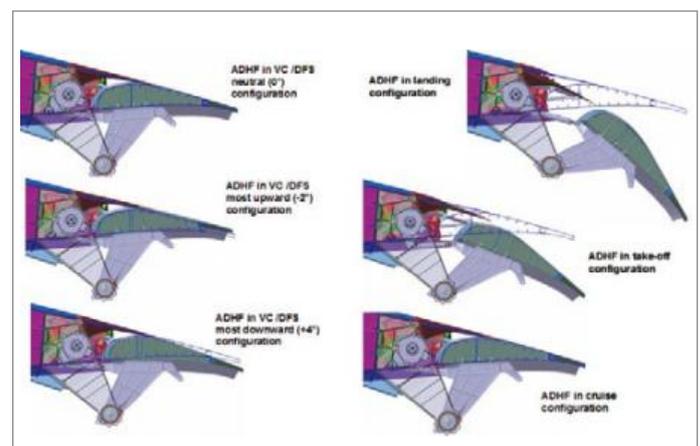
Flugerprobung geführt werden. Die an der Tragflügelhinterkante angebrachten neuartigen „mini Trailing Edge Devices“ (miniTED) zeigen trotz ihrer sehr geringen Abmessungen eine signifikante Wirksamkeit und können effektiv für Last- und Widerstandsoptimierung sowohl im Reiseflug als auch zur Steigerung der Hochauftriebsleistungen für Start und Landung verwendet werden. Der Nachteil: Die Komplexität, das Gewicht und auch die Kosten für diese zusätzlich zum vorhandenen Klappensystem installierten Steuerflächen sind derzeit noch zu hoch. Daher konnte eine mögliche Anwendung am Produkt bis dato nicht realisiert werden.

Eine alternative Philosophie wurde deshalb im Rahmen des Projekts **IHK/HICON** des deutschen Luftfahrtforschungsprogramms verfolgt: Hier wurde auf zusätzliche Steuerflächen bewusst verzichtet und eine integrierte, multifunktionale Systemlösung erarbeitet. Diese ermöglicht sowohl das Einstellen der gesamten Basis-Klappe auch für kleinere positive und negative Verformungen des noch geschlossenen Reiseflugprofils, als auch schnelle beidseitige große Ausschläge analog eines Querruders. Die Nachteile der zusätzlichen Komplexität konnten reduziert werden, die neue Funktionalität ist bereits in der „Basis-Klappe“ enthalten.

A350 XWB – Der Schritt in die Multifunktionalität

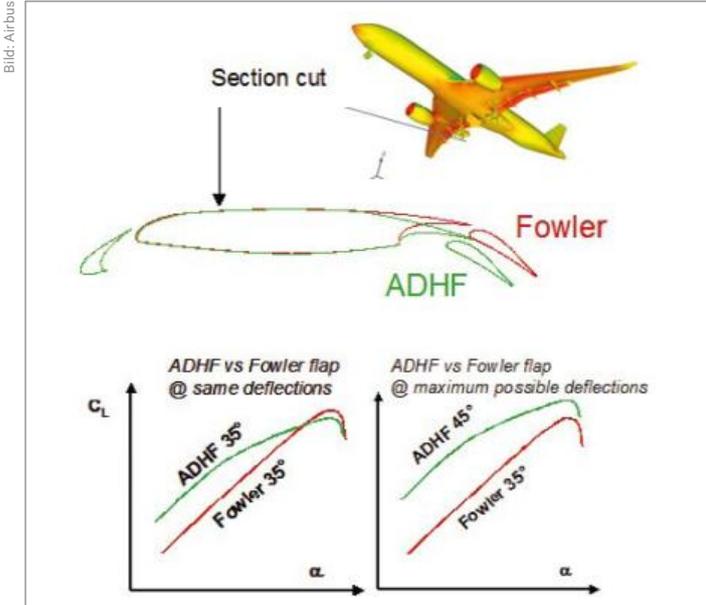
Bei der Entwicklung der A350 XWB entschlossen sich die Ingenieure für eine Lösung, die auf dem **HICON-Forschungsprogramm** basiert. Diese sogenannte „Adaptive Dropped Hinge Flap“ (ADHF) ist charakterisiert durch die **Kombination** einer Drehpunktkinematik (die Klappe bewegt sich auf einem simplen Kreisbogen um einen Drehpunkt) mit einer aktiven Spaltkontrolle durch die Spoiler-Elemente (die Spoiler werden der Klappenbewegung nachgeführt und steuern so die optimale Breite des aerodynamischen Spalts zwischen Klappe und Flügel). Diese Kombination führte zu einer deutlichen Steigerung der Hochauftriebsleistungen gegenüber einer klassischen „Fowler“-Klappe, wie sie an den bisherigen Airbus-Modellen genutzt wurde.

Alleine durch die im Vergleich höhere aerodynamische Effizienz des ADHF-Konzepts und die geringere Komplexität der Kinematik wurden so mehrere hundert Kilogramm Gewicht eingespart.



Die A350-XWB-Klappenpositionen für Reiseflug (links) und Start/Landung (rechts)

Bild: Airbus



Auftriebskurven (Auftriebsbeiwert über Anstellwinkel aufgetragen) für die A350 XWB Adaptive Dropped Hinge Flap (ADHF) im Vergleich zu einer klassischen "Fowler"-Klappe

Variable Wölbung und Lastkontrolle

Ein weiterer großer Vorteil des Konzepts ist die einfache Möglichkeit mit der ADHF positiv und negativ gewölbte Änderungen des Tragflügelprofils im Reiseflug zu erzeugen, ohne dass sich der für die Start- und Landekonfiguration erforderliche aerodynamische Klappenspalt öffnet. Auf diese Weise kann die durch die Umströmung des Tragflügelprofils erzeugte **Druckverteilung** aktiv modifiziert werden, sprich: Der Flügel kann nun auch im Reiseflug auf den jeweiligen Flugzustand des Flugzeugs „intelligent optimiert“ eingestellt werden.

Eine entsprechende systemseitige Umsetzung im Flugsteuersystem aktiviert diese Funktionalität in entsprechenden Flugphasen. Um den nutzbaren Vorteil weiter zu erhöhen wurde im Antriebssystem der Klappen auch eine differenzielle Ansteuerung der inneren und äußeren Klappe realisiert. Auf diese Weise kann die spannenweite Verteilung der Auftriebslasten noch besser entlang des Flugprofils optimiert werden. Konkret bedeutet das: Das Flügelgewicht wird zu großen Teilen durch das durch die Auftriebskraft bewirkte Biegemoment an der Flügelwurzel getrieben. Dieses ist umso höher, je schwerer das Flugzeug ist. Indem die resultierende Auftriebskraft jedoch nach innen verlagert wird, kann das Biegemoment reduziert werden.

Diese **Verlagerung der Antriebskraft** geht jedoch gegen die Forderung nach einer möglichst „elliptischen“ Auftriebsverteilung für maximale aerodynamische Effizienz. Mit einer unveränderlichen Tragflügelprofilierung muss ein Kompromiss gefunden werden. An der A350 XWB kann die Funktion nun aber entsprechend **variiert** werden. Für das schwere Flugzeug in der frühen Flugphase kann die Auftriebskraft nach innen verlagert werden, damit sich das maximale Biegemoment und das daraus resultierende Flügelgewicht verringert. Für das leichtere Flugzeug in der späteren Flugphase wird die Auftriebskraft dann wieder in Richtung des aerodynamischen Optimums verschoben. Auf diese Weise kann ein weiterer **Gewichtsvorteil** von mehreren

hundert Kilogramm erreicht werden und, missionsabhängig, auch ein nennenswerter **Widerstandsvorteil**.

Neben diesen direkten Vorteilen, die das Design der A350 XWB verbessern konnten, stellen die verfügbaren Freiheitsgrade auch eine wertvolle Möglichkeit dar, direkt im Flug jedes Flugzeug „auf den Punkt“ zu justieren und eventuelle Bauleranzen auszugleichen. Außerdem können damit verschiedene Mitglieder der Flugzeugfamilie (je nachdem, ob A350-900 oder A350-1000) auf ihre speziellen Missionen und Auslegungsprofile optimiert werden.

Das ganzheitlich funktionale Design

Die multifunktionale Nutzung der Klappensysteme an der A350 XWB ist nur ein erster Schritt in Richtung eines ganzheitlich funktional getriebenen Entwurfs. Für kommende Tragflügelentwürfe neuer Flugzeuge wird es zukünftig keinerlei Unterscheidung mehr zwischen den verschiedenen Zielfunktionen (Flugleistungen, Steuerbarkeit, Lasten, Redundanz etc.) geben. Jede Klappe („moveable“) kann also ganz oder teilweise einer Zielfunktion dienen. Die heutige Vorab-Zuordnung der Funktionen zu Klappenelementen (Querruder für die Rollsteuerung, Vorflügel für den Hochauftrieb etc.) wird obsolet.

Natürlich erfordert dieses komplett funktional getriebene Vorgehen eine sehr hohe **Modellierungskompetenz**, auch schon in der Vorentwurfsphase. Dafür werden vorab qualifizierte „Bausteine“ genutzt, die dann entsprechend im Gesamtentwurfssystem so zusammengesetzt werden können, dass komplett neuartige Lösungen für das Flugzeug möglich werden. Um diese Basis zu schaffen, sind weiterhin umfangreiche Forschungsarbeiten erforderlich – durch konkrete detaillierte parametrische Entwurfsvariationen verschiedener, speziell noch nicht existenter Klappenkonzepte und entsprechende systematische Analyse der Effekte durch Berechnungen und qualitativ hochwertige Experimente.

Mit dieser ganzheitlich funktionalen Herangehensweise können Fehler einzelner Elemente besser abgefangen werden, was zu einer entsprechenden Reduktion von Redundanzen führt und Gewicht und Kosten des Tragflügels nochmals drastisch minimiert. Darüber hinaus ist mit einer signifikanten Verringerung der Entwicklungszeit zu rechnen.

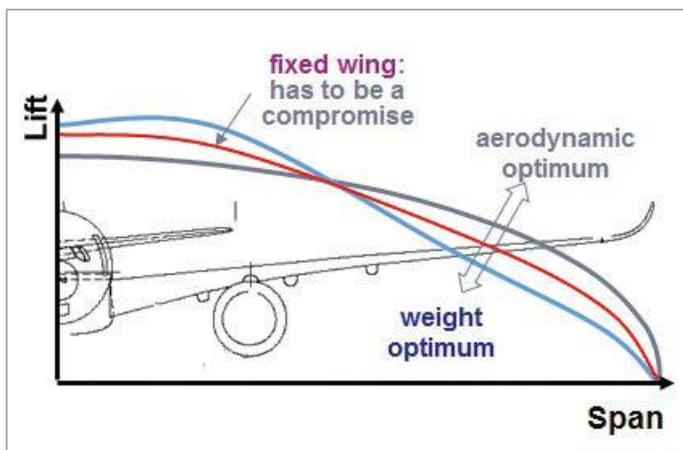


Der Airbus A350 XWB in Hochauftriebs-Konfiguration

Bild: Airbus

Bild: Airbus

Bild: Airbus



Spannweite Lastkontrolle durch variable Profilwölbung und differenzielle Klappen-Ausschläge

Lärmarter Klappenentwurf

Für aktuell im Einsatz befindliche Klappenmodelle ist ein lärm-arter Entwurf bereits von zentraler Bedeutung. Diese Bedeutung steigt für zukünftige Entwürfe. Lärm, der durch Umströmung der Flugzeugzelle – speziell des Tragflügels, der ausgefahrenen Klappen und Fahrwerke entsteht – kann zukünftig sogar den Gesamtlärm des Flugzeugs dominieren. Der Grund liegt in den immer leiser werdenden Triebwerken zukünftiger Generationen.

Dem gilt es entgegen zu wirken. Ganz konkret können für gewisse Missionen spezielle lärmarme Konfigurationen erforderlich werden, die dann im Entwurf gegen die klassischen Parameter wie Gewicht, Widerstand und Kosten optimiert werden müssen. Multifunktionale Klappensysteme können deutlich einfacher und flexibler auf derartige Zustände eingestellt werden. Außerdem kann schon im Modellierungsprozess für ein solches Klappensystem die Lärmreduktion als Ziel berücksichtigt werden.

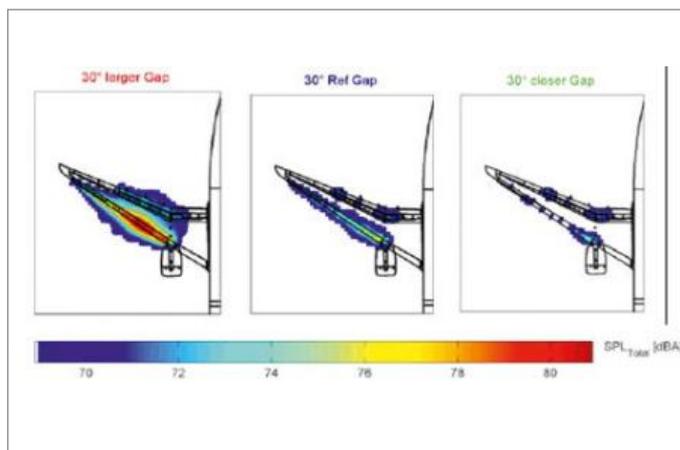
An dem **Vorderkantenklappensystem** der A350 XWB wurde ein Beispiel für den lärmarmen Entwurf bereits umgesetzt. Akustische Untersuchungen im Windkanal ergaben, dass eine reduzierte Breite des aerodynamischen Spalts zwischen Vorflügel und Hauptflügel einen sehr günstigen Effekt auf den Lärm hat. Diese Erkenntnis wurde für die Definition der detaillierten Geometrie der Vorflügelkinematik herangezogen. Damit wurde der Umströmungslärm an der Vorderkante des A350-XWB-Flügels wirkungsvoll reduziert.

Umsetzung neuartiger Technologien

Bei allen Entwicklungssprüngen der Klappensysteme ist ein Prinzip unverändert geblieben: Es werden feste Klappenkörper am Flügel ausgeschlagen und/oder ausgefahren. Doch was kommt danach? Es gibt auch komplett andersartige Mechanismen, die einen vergleichbaren Effekt bewirken können, die sich am Produkt aber bis dato nicht durchsetzen konnten.

Aktive Strömungskontrolle (durch Manipulation der Grenzschicht-Strömung durch Ausblasen) und „**Morphing**“ (direkte Formvariation eines Körpers) werden seit geraumer Zeit als Beispiele für vielversprechende Zukunftstechnologien genannt. Die prin-

Bild: Airbus



Lärmreduktion durch Spaltoptimierung am A350-XWB-Vorflügel

zipielle Machbarkeit beider Technologien wurde in Versuchen bereits eindrucksvoll belegt. So kann durch aktives Ausblasen in die Grenzschicht ein aerodynamischer Effekt erzeugt werden, der mit einem Klappen- oder Vorflügelausschlag vergleichbar ist. Formvariable „morphende“ Strukturen können geometrische Veränderungen einstellen, die sonst nur durch einen separaten Klappenkörper realisiert werden können. Beide Technologiekonzepte suggerieren, dass auf diese Weise die gleichen Funktionen der Klappensysteme mit deutlich geringerer Komplexität erreicht werden könnten. Doch der Weg in die Anwendung ist noch lange nicht geebnet. Die Frage, ob unter Berücksichtigung aller Entwurfsaspekte auch Kosten und Zuverlässigkeit einen Vorteil auf Gesamtflugzeugebene bieten, ist offen.

Ein zentraler Aspekt laufender und zukünftiger Forschungsaktivitäten ist daher die Einbindung solcher neuartiger Technologien in einem integriert entworfenen Gesamtsystem. Nur so kann ermittelt werden, ob unter realistischen Fertigungs- und Betriebsbedingungen die avisierten Vorteile überhaupt verbleiben.

Auf dem Weg zum ganzheitlich funktionalen Flügel

Auch wenn an der A350 XWB der erste Schritt in Richtung des intelligenten multifunktionalen Tragflügels gegangen wurde, bleibt für die kommende Flugzeuggeneration noch sehr viel zu tun. So ist es erforderlich, im nächsten Schritt die „Multifunktionalität“ über eine ganzheitlich getriebene „funktionale“ Entwurfs-Vorgehensweise so zu beherrschen, dass die absehbaren Optimierungspotenziale auch genutzt werden können. Weitere Entwurfsparameter, wie ein lärmoptimiertes Design oder auch die Anwendung komplett neuartiger Technologien (aktive Strömungskontrolle oder formvariable Strukturen), können auf dieser Basis konzeptioniert und umgesetzt werden.

Zu ambitioniert für den Airbus der Zukunft? Mitnichten! Die Airbus-Entwickler sind sich sicher, dass auf dem eingeschlagenen Weg in Zukunft noch viel größere Potenziale zu finden sind. ●